

水下武器抗爆试验爆源等效问题分析

张梦, 孙曙日, 张宏欣

(中国人民解放军 91439 部队 43 分队, 辽宁 大连 116041)

摘要 针对水下武器装备抗爆试验中等效药包试验缺乏明确实施规范和标准的问题,从常用的经验公式出发,通过分析计算和实例,对冲击波超压等效和冲击因子等效方法进行了比对。其中冲击因子等效方法考虑到了药包质量、爆距、爆炸与目标相对位置和姿态等因素,以等效试验结论的合理性和贴近实际程度为依据,以实际试验为例对等效试验实施进行了分析,建议等效试验爆源药量选择 15 ~ 20 kgTNT 当量为宜。

关键词 水下爆炸; 冲击因子; 试验; 等效

中图分类号 E925.21 **文献标识码** A

Analysis and Research on Explosion Source Equivalent Problem for Anti-explosion Test of Underwater Weaponry

ZHANG Meng, SUN Shuri, ZHANG Hongxin

(Section No. 43 in Unit No. 91439 of PLA, Dalian 116041, China)

Abstract Aiming at the problems of equivalent charge test lacking definite specification and standard in anti-explosion test of underwater weaponry, based on common empirical formula, in this paper the shock overpressure equivalent method and shock factor equivalent method are compared by analytical calculation and instances. For the shock factor equivalent method, the factors such as the mass of charge, the collapse distance, and the relative position and attitude between explosion and target are considered. On the basis of the rationality of equivalent test conclusion and the degree of closing to reality, taking actual test for example, this paper analyzes implementation of equivalent test, and proposes selecting 15 ~ 20 kg equivalent weight for charge mass of explosion source in equivalent test.

Key words underwater explosion; shock factor; test; equivalent

0 引言

水下武器装备在科研和鉴定试验中,经常需要考核武器装备的抗爆性能。由于完全当量的实爆(战雷等)试验爆源装药量大,安全风险等级高,海上实施困难,且成本消耗巨大。例如美国福特级航空母舰的抗冲击试验计划预算总额约占航母造价的 5% 之多。因此,在某些条件下,为了使武器装

备能够尽快形成战斗力,同时节约试验成本,有时会采用小药量等效方法对大当量条件下的抗爆指标进行换算^[1-2],得出等效的试验考核结论。然而,由于实施等效考核没有明确的规范作为指导,且对于等效爆距计算和最小装药量的选取具有较强的个人经验性和一定的随意性,最终换算的结果同样缺乏相应的标准,导致经常引起争议,因此,有必要对等效试验常用的等效换算方法进行分析研

究,下面就一些相关问题进行探讨。

1 等效方法

1.1 冲击波超压等效方法

定义变量 C_1 如下

$$C_1 = \frac{\sqrt[3]{W}}{R}$$

式中: W 为 TNT 装药质量; R 为爆源距离测量点的爆距。

根据库尔经验公式^[3],水下爆炸自由场中的冲击波超压 P 可由下式计算^[4]:

$$P = P_m e^{-\frac{t}{\theta}}$$

式中: t 为冲击波对被试品的作用时间,冲击波压力峰值由著名的 533 公式给出,

$$P_m = 5.33 \times 10^7 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{1.13}$$

冲击波衰减时间常数为

$$\theta = 0.145 \sqrt[3]{W} \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{-0.26}$$

可以看出,对于任意 2 种不同的工况,若其 C_1 是相等的,则所考虑的入射点的超压 P_m 相等。这种形式的 C_1 曾被北约和苏联用于潜艇结构生命力考核^[5],是使用较早的一种等效形式。

1.2 冲击因子等效方法

1.2.1 基于平面波假定的冲击因子

基于平面波假定的冲击因子 C_2 的形式为

$$C_2 = \frac{\sqrt{W}}{R}$$

这是基于平面波假定且结构遮挡的冲击波能量相等来定义的。

当水下爆炸冲击波是平面波时,无论爆炸大小如何,被试品在垂直于平面波传播方向上的投影面积为常数,此时只要 C_2 保持不变,则冲击波的入射能量不变。

在实际情况中,水下爆炸冲击波是一球形波,对任意球面波而言,被试品在垂直于球面波传播方向的投影面积随药包位置的变化而变化。此时,若仅仅保持 C_2 不变,并不能保证水下爆炸冲击波入

射能量不变。

1.2.2 基于球面波理论的冲击因子

$$C_3 = \sqrt{K_m} \times C_2$$

C_3 可以看作是 C_2 的一个修正。修正因子 K_m 的物理意义是考虑球面波效应后对平面波假设的修正。其值域在 0 ~ 1 之间。 C_3 能够较准确地描述水下爆炸的冲击环境,无论何种工况,只要 C_3 相等,结构的冲击响应也应近似相等^[6-7]。

冲击因子 C_1 和 C_2 中仅包含药量和爆距信息,因此较难用于等效; C_3 则除包含药量和爆距信息外,还包含结构尺度。

2 不同等效方法的比较

实爆爆源以 1 000 kg TNT 药量,爆距 80 m 为例,等效药包重量分别取为 20 kg、10 kg、5 kg、1 kg。(K_2 取 1.5,忽略 α 角的影响)。实爆 1000 kg TNT 药量爆源,爆距 80 m 处冲击波峰值和冲击因子为

$$P_m = 5.33 \times 10^7 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{1.13} = 5.33 \times 10^7 \left(\frac{\sqrt[3]{1000 \times 1.5}}{80} \right)^{1.13} = 5.923 \text{ MPa}$$

$$SF = 0.4526 \times \left(\frac{\sqrt{K_1 K_2 W}}{R} \right) = 0.4526 \times \frac{\sqrt{1000 \times 1.5}}{80} = 0.219$$

药包选取 (20 kg、10 kg、5 kg、1 kg) TNT 药量,冲击波超压等效爆距: $R_{20} = 21.715 \text{ m}$; $R_{10} = 17.235 \text{ m}$; $R_5 = 13.680 \text{ m}$; $R_1 = 8.000 \text{ m}$ 。

药包选取 (20 kg、10 kg、5 kg、1 kg) TNT 药量,冲击因子等效爆距: $R_{20} = 11.314 \text{ m}$; $R_{10} = 8.000 \text{ m}$; $R_5 = 5.657 \text{ m}$; $R_1 = 2.529 \text{ m}$ 。

药包选取 (20 kg、10 kg、5 kg、1 kg) TNT 药量,通过冲击因子等效,利用库尔公式计算出各爆距上冲击波超压值: $P_{20} = 12.374 \text{ MPa}$; $P_{10} = 14.100 \text{ MPa}$; $P_5 = 16.008 \text{ MPa}$; $P_1 = 21.763 \text{ MPa}$ 。式中^[8]: SF 为冲击因子; P 为冲击波超压值; K_1 为 TNT 当量系数; K_2 为海底反射系数,硬质海底一般取 1.5; W 为水雷装药量,kg; R 为爆源至舰船中心

的距离, m ; α 为爆源至舰船中心连线与水平面的夹角。

通过比较看出, 利用冲击因子等效比冲击波超压等效考核更为严格, 冲击波超压等效适用于远场, 冲击因子等效更适用于近场。冲击因子等效药包重量越小, 对被试品局部冲击载荷越大。等效药包重量的选取, 应根据被试品尺度的大小酌情而定, 尽量使被试品整体受到的冲击载荷相一致。

3 等效试验设计

在抗冲击考核试验中, 由于受海况和测量条件等诸多不利因素的限制, 有时不易确定被试品在水下的姿态, 使得被试品的各个部位相对于爆源的距离是不一样的, 从而使得被试品各部分受到的冲击载荷出现差异。

为达到被试品迎爆面各点承受的冲击载荷尽量接近实战, 等效药量的选取与被试品的尺度有一定的关系。从下图中可以看出, 等效药量越大爆距 $AD(S)$ 越大, AB 和 AD 的差值越小。反之, 被试品尺度越大, 等效药量就应取的越大, 这样才能保证 AB 和 AD 的差值在允许的范围。

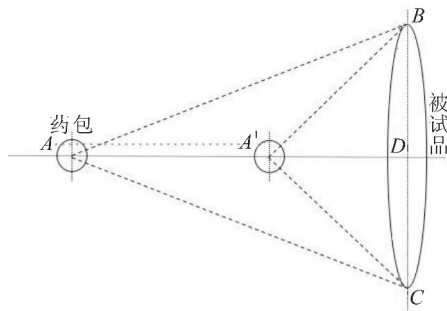


图 1 正横布放工况

Fig. 1 Working condition of laying abeam



图 2 纵向布放工况

Fig. 2 Working condition of laying lengthways

以 1 000 kg TNT 药量爆源为例, 沉底爆炸, 爆距 (AD) 80 m, 设被试品长为 3 m (忽略 α 的影响, 海底反射系数 1.5)。正横布放时 (如图 1 所示),

$AB = 80.014$ m。纵向布放时 (如图 2 所示), $EH = 81.5$ m, $EF = 78.5$ m。冲击因子的变化为

$$SF_{AD} = 0.21911; SF_{AB} = 0.21907;$$

$$SF_{EH} = 0.21508; SF_{EF} = 0.22330。$$

被试品正横状态时冲击因子最大差值:

$$SF = 0.21911 - 0.21907 = 0.0004$$

被试品纵向状态时冲击因子最大差值:

$$SF = 0.22330 - 0.21508 = 0.00822$$

等效实施被试品正横状态时冲击因子最大差值:

1) 等效药量取 20 kg TNT: 等效爆距 $S = 11.3137$ m; 爆距 $A'B = 11.4127$ m, $SF_{A'B} = 0.2172$, 变化量 $\Delta SF = 0.0018965$;

2) 等效药量取 10 kg TNT: 等效爆距 $S = 8$ m; 爆距 $A'B = 8.1394$ m, $SF_{A'B} = 0.21536$, 变化量 $\Delta SF = 0.003748$;

3) 等效药量取 1 kg TNT: 等效爆距 $S = 2.5298$ m; 爆距 $A'B = 2.941$ m, $SF_{A'B} = 0.18847$, 变化量 $\Delta SF = 0.03067$ 。

等效实施被试品纵向状态时冲击因子最大差值:

1) 等效药量取 20 kg TNT: 等效爆距 $S = 11.3137$ m; 爆距 $EF = 9.8137$ m, $SF_{EF} = 0.2526$, 爆距 $EH = 14.3137$ m, $SF_{EH} = 0.17319$, 变化量 $\Delta SF = 0.0794$;

2) 等效药量取 10 kg TNT: 等效爆距 $S = 8$ m; 爆距 $EF = 6.5$ m, $SF_{A'B} = 0.2696$, 爆距 $EH = 9.5$ m, $SF_{A'B} = 0.1845$, 变化量 $\Delta SF = 0.0851$;

3) 等效药量取 1 公斤 TNT: 等效爆距 $S = 2.5298$ m; 爆距 $EF = 1.0298$ m, $SF_{EF} = 0.5382$, 爆距 $EH = 4.0298$ m, $SF_{EH} = 0.1375$, 变化量 $\Delta SF = 0.4006$ 。

实弹爆炸试验时, 由于爆距相对较大, 被试品在水下姿态对整体考核影响较小。而等效方法实施对药包要精确定位, 通常采取刚性支撑的办法, 为了便于海上实施方便, 支杆长度不宜太长, 即爆距不能太大, 也就是说药包重量选择要合适。同时等效方法考核, 对海上试验的组织实施提出了更高的要求。

4 等效试验实施举例

4.1 某型水下武器抗爆科研试验 I

1) 试验条件。

等效药量 15 kg TNT, 爆距 13 m, 沉底爆炸, 水深 40 m。

2) 试验方法。

① 药包采用有线引爆方式, 引爆系统包括起爆电源、起爆电缆、辅助器材等。起爆电源选择 12 V 直流电源, 起爆电缆选择橡胶、屏蔽、芯线直径 $\geq 1.5 \text{ mm}^2$ 的两芯电缆, 辅助器包括电缆保护索、浮球、浮标等。

② 为了确保药包的精确位置, 试验武器与药包之间爆距通过刚性三角支架保证。三角支架长 13 m, 为便于操作分成 3 段。

③ 试验武器与药包采取同步布放的方法实施。将三角支架首段固定在试验武器上并一同放置船舷外, 并与另 2 段三角支架连为一体, 三角支架尾端挂药包并用系绳牵住, 药包和试验武器同步缓慢布放直至海底。起爆缆放到起爆船上, 边行驶边释放起爆缆至安全区域, 检测起爆电路工作状态, 正常后待命。当接到起爆命令后, 操作人员接通起爆电路, 起爆电源通过起爆电缆加到电雷管上, 电雷管爆炸药包被引爆。布放后态势如图 3。

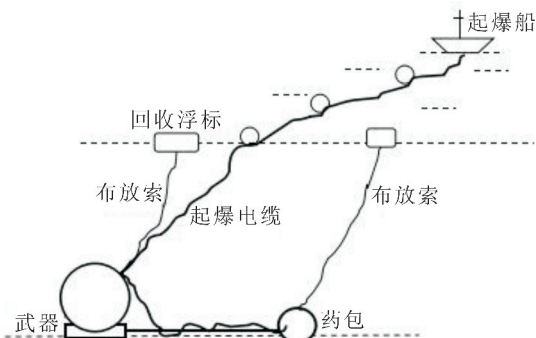


图 3 海上实施态势

Fig. 3 Implementation situation on the sea

3) 试验结果。

引爆药包 2 个, 2 个试验武器经检查外观均无损伤、气密检测合格、引信没有误动且功能正常。结论: 该型水下武器抗爆性能满足要求。

4.2 某型水下武器抗爆科研试验 II

1) 试验条件。

等效药量 1 kg TNT, 爆距 3 m, 沉底爆炸, 水深 7 m。

2) 试验方法。

① 药包采用有线引爆方式, 引爆系统包括起爆电源、起爆电缆等。起爆电源选择 12 V 直流电源, 起爆电缆选择橡胶、屏蔽、芯线直径 $\geq 1.5 \text{ mm}^2$ 的两芯电缆。

② 为了确保药包的精确位置, 试验武器与药包之间爆距通过钢管保证, 钢管长 3 m。

③ 钢管一头固定在试验武器尾端, 一头固定药包, 通过吊车实施布放, 即将试验武器、钢管、药包准备完毕后, 用吊车布入海底。起爆电源放在岸上, 通过电缆与爆源连接。操作人员接通起爆电路, 起爆电源通过起爆电缆加到电雷管上, 电雷管爆炸药包被引爆。实施态势如图 4。

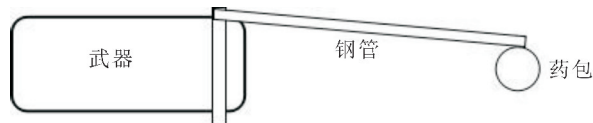


图 4 实施态势

Fig. 4 Implementation situation

3) 试验结果。

引爆药包 2 个, 2 个试验武器经检查外观均出现明显损伤(尾盖检查孔盖), 气密检测合格, 防拆装置启动, 引信一体化接收器声灵敏度降低。结论: 该型水下武器抗爆性能不满足要求。

5 结束语

用药包等效代替实爆考核, 应该是一种不得已才为之的办法。利用冲击因子等效方法代替水下武器抗爆考核, 比冲击波超压等效方法更科学、合理、严格。如果等效药包选择过小, 被试品局部受到的冲击载荷将很大, 不利于整体考核。等效药包药量的选取, 应根据被试品尺度、实施可行性等因素综合而定。综合全文所述, 给出建议如下: 1) 在实爆条件不具备, 或实施困难的情况下进行等效考核; 2) 等效考核中, 应确保被试品整体结构受到的

(下转第 89 页)